

DOI:10.11918/202410013

填芯复合固化土预制桩界面摩擦特性

李振宝¹, 张乾青^{1,2}, 王术剑^{1,3}, 林彦军⁴, 崔伟⁵

(1. 山东大学 岩土与地下工程研究院, 济南 250061; 2. 山东大学(齐河)新材料与智能装备研究院, 山东 德州 251100;
3. 山东高速建设管理集团有限公司, 济南 250001; 4. 山东省路桥集团有限公司, 济南 250013;
5. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

摘要: 填芯复合固化土预制桩由芯桩和固化土挤压形成的预制桩组成, 为了探究芯桩-预制桩界面的摩擦特性对固化土预制桩承载能力的影响, 以环形剪切试件模拟芯桩-预制桩界面的接触情况, 研究了芯桩-预制桩接触面的摩擦特性。试验结果表明: 芯桩-预制桩界面极限摩阻力随芯桩直径的增加而增大; 芯桩-预制桩界面黏结系数随填芯材料抗压强度的增加而增大, 黏结系数建议取值范围为 0.02~0.10; 芯桩-预制桩界面存在初始摩阻力, 剪切过程中界面摩阻力变化存在弹性阶段、脆性破坏阶段和黏结滑移阶段, 界面破坏模式为类脆性破坏。采用指数模型和反双曲线模型对界面摩阻力和相对位移的散点图进行拟合, 获得了考虑初始摩阻力 τ_c 的黏结滑移荷载传递模型, 可用于填芯复合固化土预制桩受荷的荷载传递规律分析。

关键词: 填芯复合固化土预制桩; 环形界面剪切试验; 摩擦特性; 黏结系数; 破坏模式; 荷载传递模型

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)11-0095-10

Interface friction characteristics of precast pile with core-filled composite solidified soil

LI Zhenbao¹, ZHANG Qianqing^{1,2}, WANG Shujian^{1,3}, LIN Yanjun⁴, CUI Wei⁵

(1. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Research Institute of New Material and Intelligent Equipment, Shandong University (Qih County), Dezhou 251100,

Shandong, China; 3. Shandong Hi-Speed Construction Management Group Co., Ltd., Jinan 250001, China;

4. Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan 250013, China; 5. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: To investigate the influence of core-pile interface friction characteristics on the bearing capacity of filled-core composite solidified soil precast piles, this study simulated the core-pile-precast-pile interfacial contact using annular shear specimens and systematically examined the frictional behavior at their interface. The experimental results demonstrated that: The ultimate interfacial frictional resistance increases with core pile diameter enlargement; The bonding coefficient between core pile and precast pile shows a positive correlation with the compressive strength of core-filling materials, with recommended values ranging from 0.02 to 0.10; An initial frictional resistance exists at the interface, and the shear-induced friction evolution exhibits three distinct phases-elastic deformation phase, brittle failure phase, and bond-slip phase, presenting a quasi-brittle failure mode. Through curve fitting of the interfacial shear stress versus relative displacement scatter plots using exponential and inverse hyperbolic models, a bond-slip load transfer model incorporating initial frictional resistance (τ_c) was established. This model effectively characterizes the load transfer mechanism in filled-core composite solidified soil precast piles under loading conditions. The proposed methodology provides theoretical support for analyzing the bearing behavior and interfacial interaction mechanisms of this novel pile foundation system.

Keywords: precast pile with core-filled composite solidified soil; annular interfacial shear test; friction characteristics; bond coefficient; destruction mode; load transfer model

不同结构接触面的摩擦特性是岩土工程领域研究的热点问题^[1-3], 对接触特性的研究多采用室内试验的方式, 通过复现与实际工程相近的接触面, 实

现摩擦特性的精细化研究^[4-5]。在桩基工程领域, 桩-土界面的接触特性与桩基承载特性分析和桩基沉降计算息息相关^[6-7]。随着设计和施工水平的提

收稿日期: 2024-10-09; 录用日期: 2024-10-29; 网络首发日期: 2025-08-01

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250801.1019.002>

基金项目: 山东省泰山学者青年专家项目(tsqn202103163); 国家自然科学基金面上项目(52278358); 山东大学杰出中青年学者人才计划

作者简介: 李振宝(1996—), 男, 博士研究生; 张乾青(1983—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 张乾青, zjuzqq@163.com

高,越来越多的新桩型出现,如:混凝土芯水泥土复合桩^[8]、高喷插芯组合桩^[9]、劲钻根植桩^[10]和劲芯水泥搅拌桩^[11]。新型桩多由水泥土包裹高强度芯桩复合而成,养护完成后芯桩与外围水泥土紧密接触,有利于侧摩阻力发挥,提高桩基承载力。

国内外学者采用多种研究方法对该类复合桩的界面摩擦特性进行了分析。如:Li 等^[12]通过直剪试验分析了砂浆-混凝土界面的黏结强度;周佳锦等^[10,13]通过室内模型试验、现场试验等方法,对劲钻根植桩的界面摩擦特性和承载性能进行了分析;还有学者^[8,11]通过室内试验和现场试验对混凝土桩-水泥土界面的抗剪强度进行了分析,并系统研究了黏结系数与水泥掺量、养护龄期的关系。复合桩用于软弱地基加固时,一般存在混凝土-水泥砂浆和水泥砂浆-土两个接触界面,混凝土-水泥砂浆

界面的接触特性会对复合桩的沉降特性和破坏模式产生影响。张振等^[14]对复合桩地基的桩土应力比和桩体破坏模式进行了研究。

本文的研究对象为填芯复合固化土预制桩^[15](图 1),作为一种“内刚外柔”的新型复合桩,预制桩和芯桩接触面的摩擦特性与传统桩基不同。目前关于芯桩-预制桩接触面摩擦特性的研究有限,且现有研究多通过直剪试验获得界面的摩擦特性,无法考虑实际工程中接触面受力形式和边界条件,也无法满足试验多样化的需要。当填芯复合固化土预制桩用于地基加固时,预制桩-芯桩界面的黏结特性不易在实际工程中进行监测。因此需要开展室内三维界面条件下的环形剪切试验,对接触面的摩擦特性进行研究。

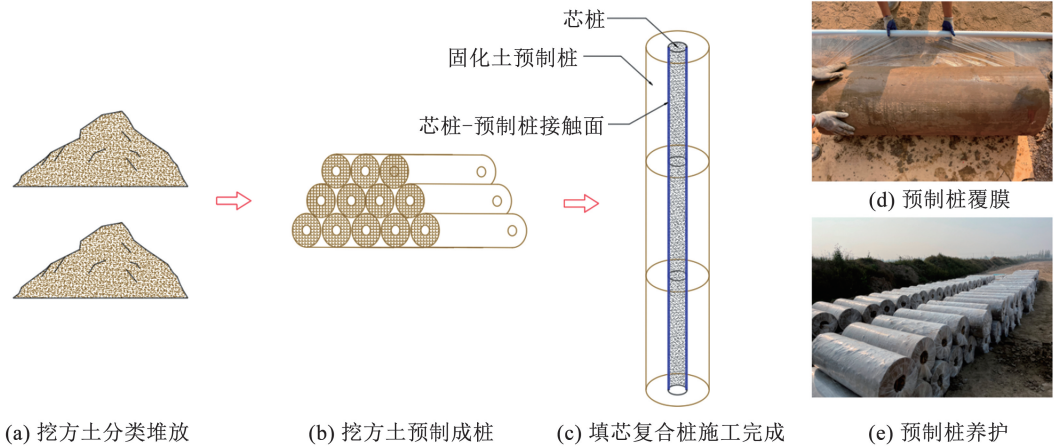


图 1 填芯复合固化土预制桩生产工艺示意

Fig. 1 Production process of solidified soil precast pile

基于上述分析,本文将开展一系列室内环形芯桩-预制桩接触面剪切试验,对具有黏结特性的界面摩擦特性进行研究。通过控制试验过程中接触面受力形式和边界条件的一致性,实现接触面摩擦特性的复现。同时,通过改变芯桩材料、直径和养护龄期等条件,研究不同因素对界面摩擦特性的影响。在试验结果基础上,建立考虑界面黏结强度的黏结滑移模型,为填芯复合固化土预制桩沉降计算方法的建立提供依据。

1 环形界面剪切试验

1.1 试验准备

1.1.1 试验装置

本试验采用自主改进的试验装置进行,如图 2 所示。设备配套位移传感器最大量程为 20 mm,精度为 0.1 mm,压力机最大荷载为 40 kN,采用位移控制方式加载。

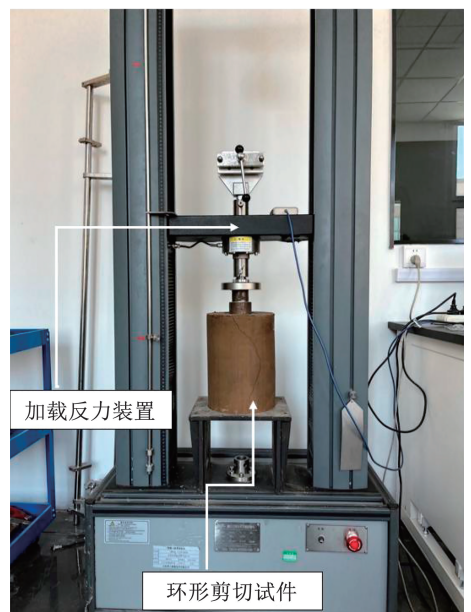


图 2 剪切试验装置

Fig. 2 Diagram of shear test device

1.1.2 试验材料

试验所用土样取自某高速路段挖方弃土, 土样的主要物理力学参数: 重度为 18.9 kN/m^3 , 初始含水率为 14.8% , 泊松比为 0.3 , 黏聚力为 15 kPa , 内摩擦角为 30° , 压缩模量为 20 MPa , 塑性指数为 16.6 , 液性指数为 0.45 , 试验用土样为粉质黏土。试验所用的剪切试件如图 3 所示。由图 3 可知, 环

形剪切试件由芯桩和改性固化土桩两部分组成。芯桩居中, 模拟填芯复合固化土预制桩的桩身结构。填芯复合固化土预制桩的外直径为 20 cm 。试件的制作采用改性土击实成桩, 水泥砂浆灌注自然凝固的成桩方式。试验用水泥为 Po 42.5, 所用砂为细砂, 平均粒径为 $0.25 \sim 0.35 \text{ mm}$ 。灌注的水泥砂浆是按照水泥、砂、水的质量比为 $1:5.27:1.13$ 制成。

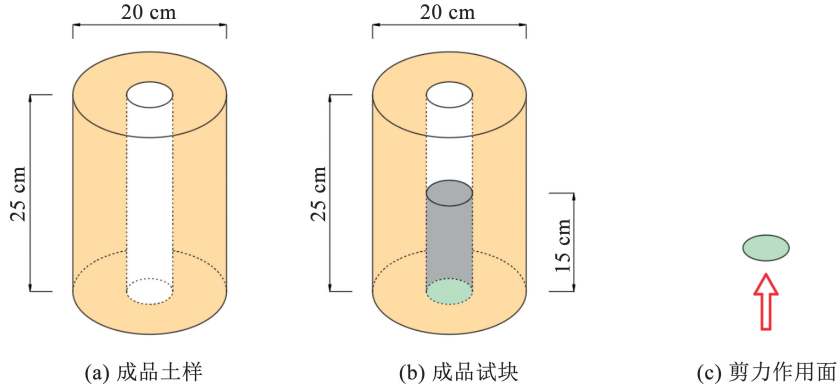


图 3 剪切试验装置

Fig. 3 Diagram of shear specimen schematic

使用制样模具(图 4)对改性土进行击实, 击实后脱模, 在试件中心孔内灌注流态材料, 灌注过程中使用玻璃棒进行引流、振捣, 提高芯桩密实度。灌注完成后振捣密实, 在标准养护箱内养护。同时, 将流态材料制成 $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$ ^[16] 的标

准立方体试块, 在标准养护箱内与剪切试件养护相同时间。根据试验设计养护龄期不同, 选择养护完成的剪切试件和相应的立方体试块, 分别进行剪切试验和无侧限抗压强度试验, 测定芯桩-预制桩界面的摩擦特性和受压试块的无侧限抗压强度。

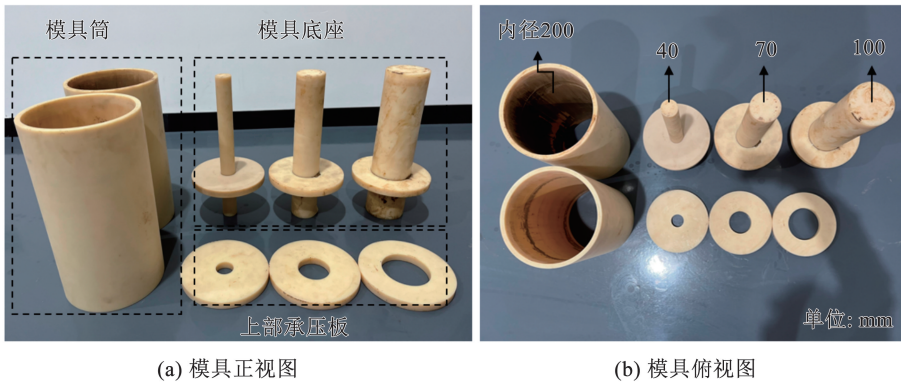


图 4 剪切试件模具

Fig. 4 Shear specimen mold

由图 4 可知, 环形剪切试件的模具主要由三部分组成: 模具筒、芯柱和上下承压板, 其中模具筒的作用是作为改性固化土的容器, 内壁光滑, 高度为 40 cm , 内径为 20 cm ; 芯柱的作用是在击实成桩过程中为流态材料的灌注预留空间, 包含 $4、7、10 \text{ cm}$ 3 个不同尺寸; 上下承压板的作用是对改性土进行加压, 形成预制桩。

作工作。主要流程(图 5)为: 1) 将现场挖方土进行过 2 cm 筛处理, 除去其中的草筋、碎石等杂质, 并对土中的大颗粒进行粉碎处理, 确保土颗粒能够与外加剂混合均匀; 2) 每个试件所需原状土质量为 17 kg , 外加剂质量为 1.7 kg , 搅拌均匀后, 采用喷淋方式加入水, 调整混合土样的含水率为 16% ; 3) 在模具筒内壁均匀涂抹脱模剂, 方便后期脱模, 向试样筒内分层加入混合改性土, 并逐层进行击实, 控制试件密度差异; 4) 每个试件的质量相同, 保证密实度

1.1.3 试件制作过程

试验所需材料和设备准备完成后, 开始试件制

满足试验要求。填筑完成后,进行脱模工作;5) 固化土试样脱模后,使用薄膜包裹。灌注流态材料,灌

注高度设计为 15 cm。灌注结束后,放入标准养护箱内进行养护。

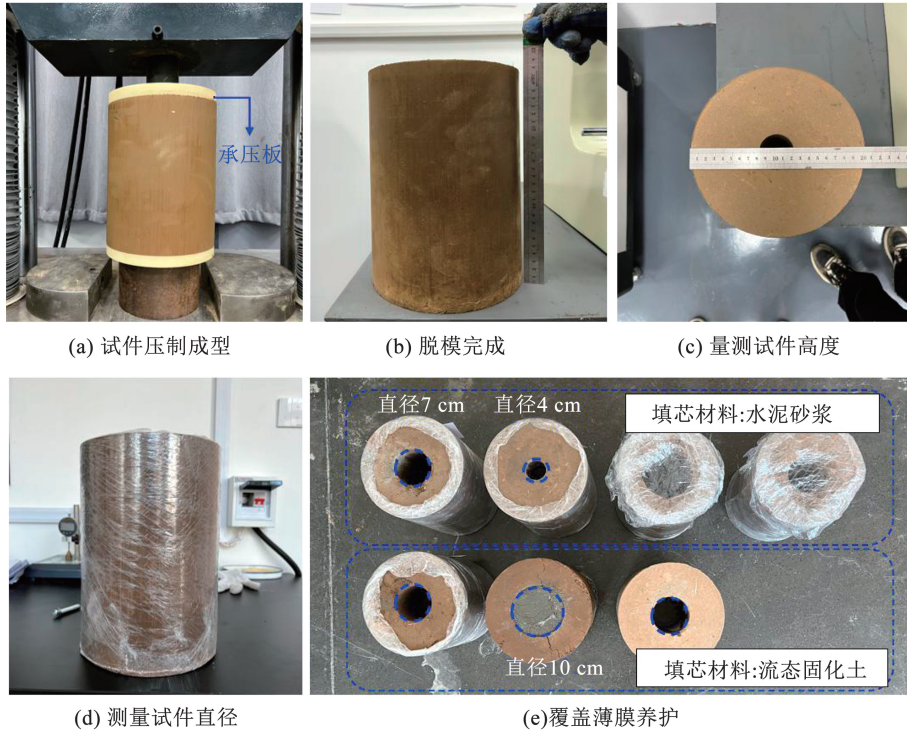


图 5 剪切试件模具流程

Fig. 5 Process of shear specimen production

本试验共制作 27 个剪切试件,包含 9 组,每组 3 个剪切试件,将芯桩材料(固化土、M10 砂浆、M15 砂浆)、养护龄期(3、7、28 d)和芯桩直径(4、7、10 cm)作为变量,研究上述因素对界面摩擦特性的影响。

1.2 剪切试验过程

采用位移控制方式对试件进行加载,设置加载速率为 0.5 mm/min。监测试验过程中芯桩顶部力-位移的变化,得到固化土桩-芯桩界面摩阻力变化曲线。界面的摩阻力计算公式为

$$\tau = \frac{F}{\pi dl_c} \quad (1)$$

式中: τ 为预制桩-芯桩界面的摩阻力, F 为芯桩顶部荷载, d 为芯桩直径, l_c 为芯桩高度

剪切试验完成后,部分预制桩的外表面出现了沿桩长方向的竖向裂缝,且裂缝宽度随荷载的增加而增大,如图 6 所示。

在试验过程中,由于预制桩-芯桩界面摩擦产生界面黏聚势能和摩擦势能释放会产生外抵力^[5,17],接触面出现剪胀现象,导致固化土桩膨胀而产生竖向裂缝破坏。试验过程中,加载初期固化土桩基本完好。随着顶部荷载增大,裂缝宽度增大,在荷载达到极值后,基本保持不变。当填芯材料为流态固化土时,竖向裂缝宽度小于相同直径的水泥砂浆(图 6(b)),这表明预制桩-芯桩(流态固化土)界

面的外抵力小于预制桩-芯桩(水泥砂浆)界面的外抵力。

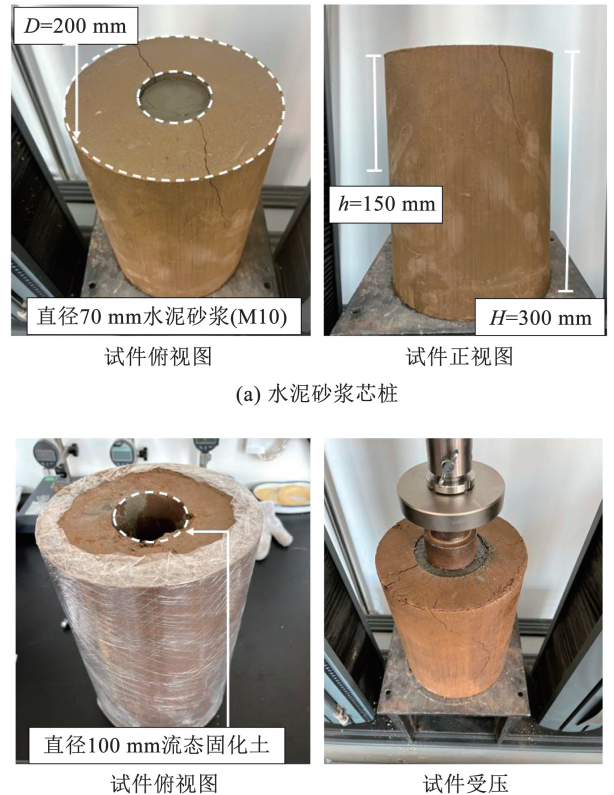


图 6 剪切试件破坏形态

Fig. 6 Failure mode of shear specimen

图 7 为试验后固化土桩-芯桩界面的破坏面。由图 7 可知, 剪切试件的破坏主要发生在固化土桩-芯桩的交界面, 且界面破坏面平整, 固化土桩内部未发生剪切破坏。观察破坏面仍有填芯材料(水泥砂浆、流态固化土)残留, 这与王伟^[17]的研究结果基本一致。固化土桩为预制挤压成型, 内表面光滑, 固化土桩-芯桩界面的抗剪强度小于固化土的抗剪强度, 导致破坏面均为预制桩-芯桩界面。对比图 7(a)、7(b)可知, 破坏后水泥砂浆芯桩上仍残留有固化土痕迹, 流态固化土芯桩的表面光滑。因此, 水泥砂浆填芯与固化土桩的界面结合更紧密, 表明两界面在养护后产生了充分的黏结, 有利于界面摩擦阻力的发挥。



(a) 水泥砂浆芯桩



(b) 流态固化土芯桩

图 7 预制桩-芯桩界面破坏

Fig. 7 Interface failure of precast pile-core pile

2 试验结果分析

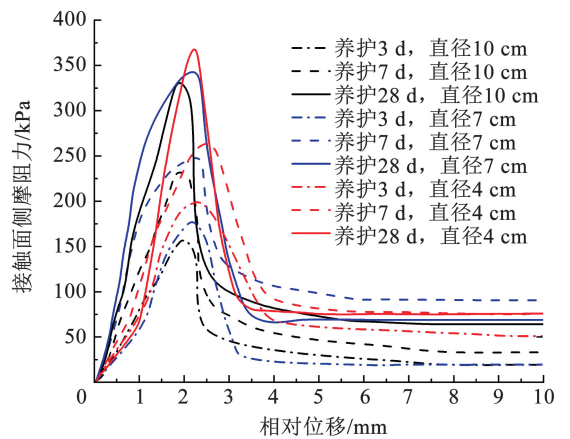
2.1 界面摩阻力-相对位移曲线

不同养护龄期、填芯材料和接触面尺寸的试件试验, 所得界面摩阻力-相对位移曲线如图 8 所示。

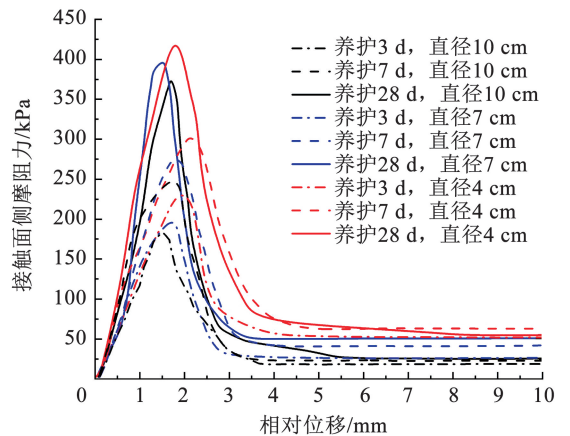
表 1 所示为剪切试件的极限摩阻力。表 2 所示为界面达到极限摩阻力后, 残余摩阻力的变化情况。将界面达到极限摩阻力时对应的位移定义为极限弹性位移, 界面残余摩阻力基本不变时对应的位移定义为极限塑性位移, 相关试验结果见表 3。

由图 8 和表 2 可知, 芯桩直径越小, 固化土预制桩厚度越大, 残余摩阻力越大。这表明芯桩直径越小, 接触面塑性和延性越高, 预制桩的承载力越高。残余摩阻力受含芯率的影响较小, 不同填芯材料的界面残余摩阻力相差较大, 水泥砂浆材料的残余摩

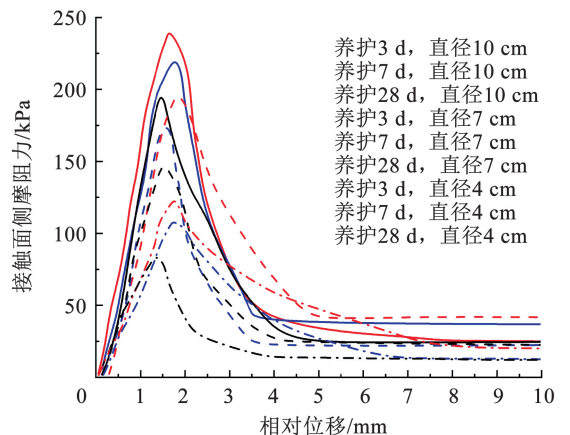
阻力在 18.5 ~ 95.8 kPa 之间, 流态固化土材料的残余摩阻力在 12.1 ~ 47.1 kPa 之间, 水泥砂浆材料的残余摩阻力与极限摩阻力的比值在 0.1 ~ 0.26 之间, 流态固化土材料的残余摩阻力与极限摩阻力的比值在 0.1 ~ 0.21 之间。试验结果呈现明显的材料异性, 水泥砂浆材料的残余摩阻力高于流态固化土。由表 2、3 可知, 固化土预制桩-芯桩界面的残余摩阻力受材料养护龄期的影响较小, 受芯桩直径影响较大。



(a) M10 水泥砂浆



(b) M15 水泥砂浆



(c) 流态固化土

图 8 摩阻力-相对位移曲线

Fig. 8 Curve of shaft resistance-relative displacement

表 1 不同芯桩直径试件的界面极限摩阻力

Tab. 1 Ultimate interface frictional resistance of core piles with varying diameters

填芯材料	养护龄期/d	摩阻力/kPa		
		4 cm	7 cm	10 cm
M10 水泥砂浆	3	223.3	184.3	156.3
	7	267.8	249.5	232.4
	28	372.3	352.5	332.7
M15 水泥砂浆	3	235.5	204.5	184.7
	7	302.4	275.6	253.0
	28	434.7	399.4	375.2
流态固化土	3	124.6	105.1	86.3
	7	200.1	175.3	149.6
	28	241.7	223.3	195.8

表 2 不同芯桩直径试件的界面残余摩阻力

Tab. 2 Residual shaft resistance of core piles with varying diameters

填芯材料	养护龄期/d	残余摩阻力/kPa		
		4 cm	7 cm	10 cm
M10 水泥砂浆	3	53.6	33.2	18.8
	7	72.0	43.9	29.1
	28	95.8	74.5	44.8
M15 水泥砂浆	3	51.8	30.7	18.5
	7	60.2	37.1	25.8
	28	82.6	58.9	37.9
流态固化土	3	27.3	17.9	12.1
	7	40.1	22.3	25.4
	28	47.1	36.8	23.4

表 3 不同芯桩直径试件的界面极限弹性位移

Tab. 3 Limit elastic displacement of core piles with varying diameters

填芯材料	养护龄期/d	极限弹性位移/mm		
		4 cm	7 cm	10 cm
M10 水泥砂浆	3	2.41	2.21	1.95
	7	2.62	2.34	1.87
	28	2.51	2.25	1.86
M15 水泥砂浆	3	1.89	1.7	1.51
	7	2.1	1.81	1.69
	28	2.06	1.52	1.72
流态固化土	3	1.79	1.75	1.34
	7	1.85	1.61	1.56
	28	1.65	1.88	1.49

2.2 芯桩直径对摩擦特性的影响

填芯复合固化土预制桩作为复合桩的一种,含芯率是影响桩承载特性发挥的关键因素,其定义为

$$\alpha = A_c / A_s \quad (2)$$

式中: α 为含芯率, A_c 为芯桩的截面面积, A_s 为固化

土桩的截面面积。

本研究开展的三维剪切试验,能够考虑接触面受力和边界条件影响,并进一步考虑含芯率对接触面摩擦特性的影响。不同直径 4、7、10 cm 试件的含芯率分别为 0.04、0.122 5、0.25。

不同试件的极限摩阻力如图 9 所示。由图 9 可知,剪切试件的外径相同,随着芯桩直径的增大,含芯率的提高,预制桩-芯桩界面的极限摩阻力呈减小趋势。养护龄期对极限摩阻力的发挥有积极作用,养护龄期越长界面极限摩阻力越大。

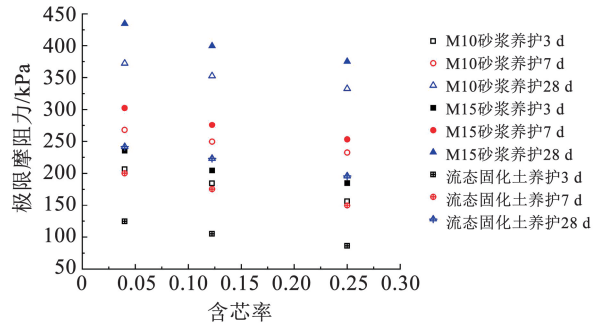


图 9 极限摩阻力-含芯率的散点图

Fig. 9 Scatter plot of ultimate frictional resistance-core content

以 M10 水泥砂浆试件为例,养护时间从 3 d 到 7 d 和从 7 d 到 28 d,界面的极限摩阻力分别增加了 44.5、104.5 kPa,后者是前者的 2.35 倍。以养护龄期 28 d 的剪切试件试验结果为例,当芯桩直径由 4 cm 增加至 10 cm 时,流态固化土、M10 水泥砂浆和 M15 水泥砂浆的界面极限摩阻力降幅分别为 53.0、45.9、39.7 kPa,含芯率的增加导致界面极限摩阻力减小。

产生这一现象的原因可能是:随着含芯率的增加,固化土预制桩的厚度减小,在试验过程中,其自身更易产生破坏,对芯桩的握裹力减小,预制桩-芯桩界面出现应力松弛,导致界面极限摩阻力降低。

图 10 为固化土桩-芯桩界面达到极限摩阻力时对应的极限弹性位移与含芯率的关系曲线。

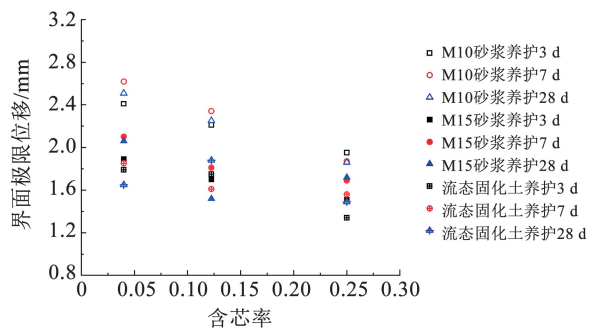


图 10 极限弹性位移-含芯率的散点图

Fig. 10 Scatter plot of ultimate elastic displacement and core content

由图 10 可知, 固化土桩-芯桩界面极限弹性位移随含芯率的增加而减小, 变化幅度较小, 其值主要在 1.18 ~ 2.61 mm 之间。

2.3 养护龄期对摩擦特性的影响

将填芯材料的养护时间设置为 3、7、28 d。达到养护龄期后, 将试块从模具内取出, 使用锉刀对试块的表面进行修整, 保证受压面的平整, 并满足 100 mm 的尺寸要求, 进行抗压强度试验。养护完成的试块如图 11 所示, 表 4 所示为不同养护龄期下试块和流态固化土试块的平均无侧限抗压强度。

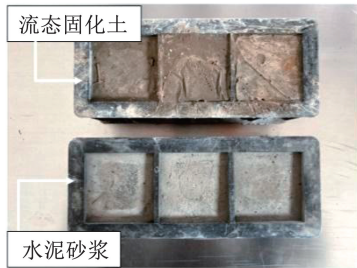


图 11 填芯材料试块

Fig. 11 Photo of test block

表 4 无侧限抗压强度与养护龄期的关系

Tab. 4 Relationship between unconfined compressive strength and curing age

养护龄期/d	无侧限抗压强度/MPa		
	M10 水泥砂浆	M15 水泥砂浆	流态固化土
3	2.24	3.22	1.36
7	4.28	8.65	2.42
28	11.1	15.6	4.74

图 12 为不同直径芯桩与养护时间的关系曲线。由图 12 可知, 预制桩-芯桩接触面的极限摩阻力与试块抗压强度的关系密切, 两者呈现正相关关系。对界面极限摩阻力和试块抗压强度进行拟合发现, 界面极限摩阻力与试块抗压强度的关系可使用线性关系表征。以 M10 水泥砂浆试件为例, 养护龄期从 3 d 到 7 d, 抗压强度增长率为 91.1%; 不同直径试件(4、7、10 cm) 极限摩阻力的增长幅度分别为 19.9%、35.4%、48.7%。养护龄期从 7 d 到 28 d 时, 试块抗压强度增长率为 159.3%, 不同直径试件(4、7、10 cm) 极限摩阻力的增长幅度分别为 39.0%、41.3%、43.2%。试验表明养护龄期对预制桩-芯桩界面的摩擦特性有显著影响, 养护龄期越长, 界面摩阻力越大。

图 13 为试件极限位移-养护龄期关系曲线。由图 13 可知, 界面极限位移受试块养护龄期的影响较小, 不同填芯材料、不同芯桩直径试件的极限位移在 1.34 ~ 2.62 mm 之间。

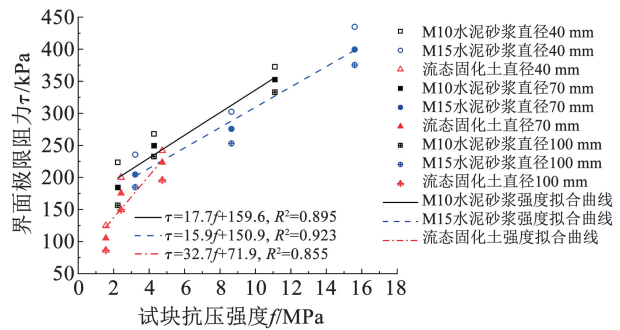


图 12 极限摩阻力-试块抗压强度关系曲线

Fig. 12 Ultimate shaft resistance-compressive strength curve of test block

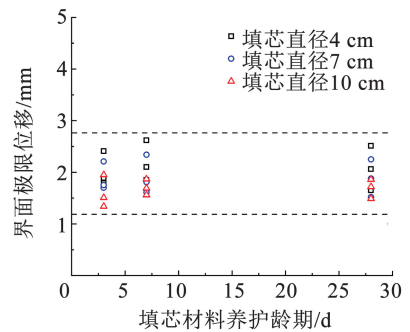


图 13 界面极限位移-试件养护龄期的散点图

Fig. 13 Scatter plot of ultimate displacement and curing age

2.4 填芯材料对摩擦特性的影响

填芯材料的性质对接触面摩擦特性的影响显著。通过试验分析填芯材料对接触面性质的影响, 能够为工程应用提供指导。室内剪切试验得到填芯材料与摩擦特性的关系, 见表 5 (以芯桩直径为 7 cm 的试件为例)。

表 5 界面摩阻力与养护龄期的关系

Tab. 5 The relationship between interface friction resistance and curing age

摩阻力	养护龄期/d	界面摩阻力/kPa		
		M10 水泥砂浆	M15 水泥砂浆	流态固化土
极限摩阻力	3	184.3	204.5	105.1
	7	249.5	275.6	175.3
	28	352.5	399.4	223.3
残余摩阻力	3	33.2	30.7	17.9
	7	43.9	37.1	22.3
	28	74.5	58.9	36.8

由表 5 可知, 填芯材料的抗压强度越大, 固化土预制桩-芯桩界面的极限摩阻力越大, 不同填芯材料在界面达到极限摩阻力后均产生破坏, 残余摩阻力在 15 ~ 80 kPa 之间, 受填芯材料的影响较小。

3 分析与讨论

3.1 极限摩阻力与抗压强度分析

室内剪切试验结果表明, 预制桩-芯桩的界面极限摩阻力与材料的无侧限抗压强度有关, 这与 Dai 等^[18-19]的研究成果相似。根据 Nam 等^[20]提出的黏结系数概念, 将预制桩-芯桩界面的极限摩阻力与材料的无侧限抗压强度建立联系。根据前文研究, 本节引入黏结系数的概念对预制桩-芯桩界面具有黏结滑移特性的荷载传递进行表征。定义界面极限摩阻力与材料无侧限抗压强度的比值为 β , 即

$$\beta = \tau_u / f_{cu} \quad (3)$$

式中: τ_u 为界面的极限摩阻力, f_{cu} 为填芯材料试块的无侧限抗压强度。

根据前文试验结果, 界面黏结系数与材料、养护龄期和试件尺寸的关系见表 6。

表 6 界面黏结系数
Tab. 6 Interface bond coefficient

填芯材料	固化土养护龄期/d	芯桩直径/cm		
		4 cm	7 cm	10 cm
M10 水泥砂浆	3	0.100	0.083	0.070
	7	0.063	0.058	0.054
	28	0.034	0.032	0.030
M15 水泥砂浆	3	0.073	0.064	0.057
	7	0.035	0.032	0.029
	28	0.028	0.026	0.024
流态固化土	3	0.092	0.077	0.063
	7	0.083	0.072	0.062
	28	0.050	0.047	0.041

由表 6 可知, 不同材料剪切试件的黏结系数均呈现随养护龄期、芯桩直径的增加而减小的趋势, 其值在 0.02 ~ 0.1 之间变化。

图 14 为不同养护龄期和芯桩直径的界面黏结系数和含芯率的关系曲线。由图 14 可知, 界面黏结系数与含芯率呈负相关关系, 且变化趋势与极限摩阻力的变化基本一致。

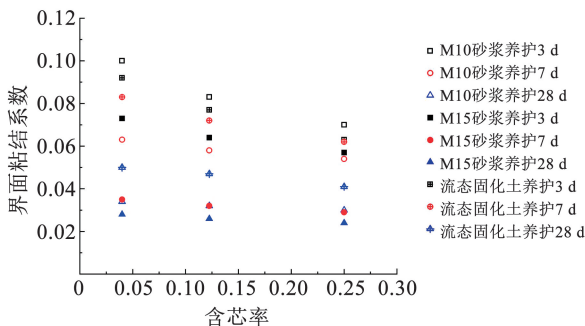


图 14 界面黏结系数-含芯率的散点图

Fig. 14 Scatter plot of interfacial bond coefficient-core content

图 15 为界面黏结系数和芯桩材料无侧限抗压强度的关系。由图 15 可知, 界面黏结系数的变化与材料无侧限抗压强度的相关性显著。当材料无侧限抗压强度较低时, 黏结系数较大, 这表明试件养护初期, 界面的黏结特性表现显著, 能够快速提供界面所需的摩阻力。随着养护龄期增加, 试块的无侧限抗压强度增大, 界面黏结系数减小, 且试块抗压强度大于 8 MPa 后, 黏结系数基本保持不变。这表明界面摩阻力已基本达到最大值。

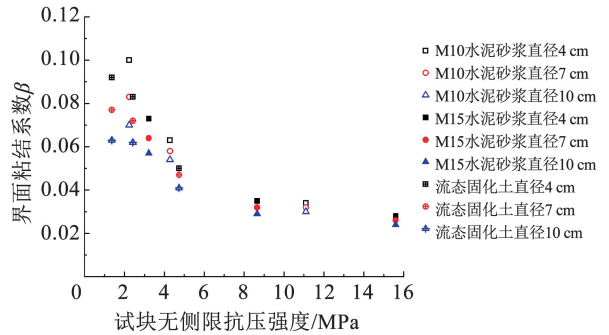


图 15 界面黏结系数和材料无侧限抗压强度的散点图

Fig. 15 Scatter plot of interfacial bonding coefficient and unconfined compressive strength of material

3.2 考虑初始黏聚力的荷载传递模型

荷载传递模型能够反映预制桩-芯桩界面的应力应变关系, 对桩基荷载沉降的计算具有重要意义。土与混凝土界面的剪切试验^[21-24]表明, 在试验的初始阶段, 界面剪应力增大, 而相对位移变化极小, 几乎为零。殷宗泽等^[23]通过大尺寸直剪试验证明, 当界面剪应力小于某一临界值时, 只有紧靠剪切盒边缘的测点产生了位移, 而剪切面内无相对位移的产生。因此, 对剪切面上任一而言, 当 $\tau < \tau_c$ (界面初始摩阻力) 时, 该点无相对位移产生。这表明两接触面间存在初始临界摩阻力, 而预制桩-芯桩界面的初始临界摩阻力是填芯材料灌注后, 在养护过程中两界面产生的黏聚力。以往的荷载传递模型曲线模型和折线模型^[24-26]均未考虑初始黏聚力的存在, 因此本节将建立考虑初始黏聚力的荷载传递模型, 对预制桩-芯桩界面的荷载传递行为进行准确刻画。

图 16 为本文剪切试验预制桩-芯桩界面的摩阻力-相对位移实测值归一化后所得拟合曲线。

由图 16 可知, 拟合曲线可以对芯桩-预制桩界面的摩擦行为进行模拟。根据剪切位移的变化可将剪切过程分解为弹性阶段(拟合曲线 1)、脆性破坏阶段(拟合曲线 2)和黏结滑移阶段(拟合曲线 3)。界面的本构关系为

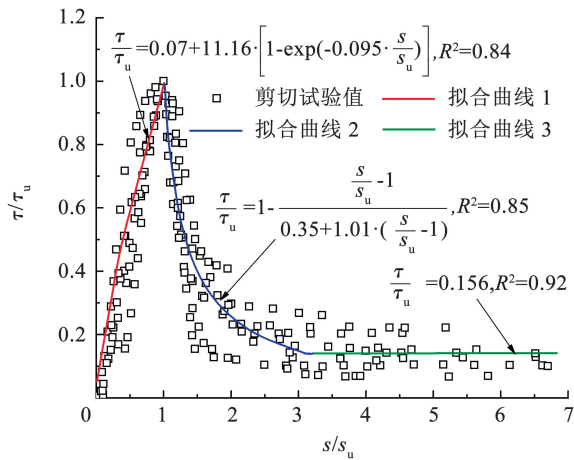


图 16 摩擦力和相对位移的归一化关系曲线

Fig. 16 Normalized relationship between shaft resistance and displacement

$$\tau = \begin{cases} \tau_c + a[1 - \exp(-bs)], & 0 \leq s \leq s_u \\ \tau_u \frac{s - s_u}{A + B(s - s_u)}, & s_u \leq s < s_r \\ \tau_r, & s \geq s_r \end{cases} \quad (4)$$

式中: τ 为界面摩阻力, s 为界面相对位移, τ_c 为界面初始摩阻力, 本文试验结果为 10 ~ 45 kPa; τ_u 为界面极限摩阻力, 本文试验结果为 86.3 ~ 434.7 kPa; τ_r 为剪切界面的残余摩阻力, 本文试验结果为 12.1 ~ 95.8 kPa; s_u 为弹性极限相对位移, 本文试验结果为 1.34 ~ 2.62 mm; s_r 为残余摩阻力临界相对位移, 本文试验结果为达到弹性极限位移后的 0.5 ~ 1.0 mm。

4 结 论

本文采用室内试验的方法对预制桩-芯桩的界面摩擦特性进行了研究, 制作了环形剪切试件, 消除二维剪切边界效应的影响。考虑了不同材料、养护龄期和芯桩直径等因素对界面摩擦特性的影响, 主要结论如下:

1) 试验表明, 减小芯桩直径对预制桩-芯桩界面的剪切力学行为具有积极影响; 极限摩阻力与芯桩直径呈明显负相关性 (即直径减小, 摩阻力增大)。预制桩壁厚的增加, 显著增强了界面剪切受荷过程中的塑性和延性表现, 从而更有利于界面极限摩阻力的高效发挥。

2) 养护龄期是影响界面极限摩阻力的关键因素, 其增长能显著提升摩阻力。此外, 材料的无侧限抗压强度与极限摩阻力呈现稳定的线性正相关关系。界面黏结系数与材料存在相关性, 建议取值为 0.02 ~ 0.10。

3) 预制桩-芯桩界面的主要剪切破坏模式具有类脆性特征, 包含弹性、峰值后脆性破坏及滑移摩擦

3 个阶段。指数与反双曲线本构模型被证实适用于描述此界面的摩阻力-位移响应特性。剪切初始阶段即存在初始摩阻力 τ_c , 建议取值为 10 ~ 45 kPa。

4) 以地基承载力为设计指标, 填芯复合固化土预制桩的设计宜提高芯桩材料的抗压强度、增大预制桩的直径。浇筑完成后, 复合桩养护龄期不应小于 7 d。

参考文献

- [1] ZHANG Xuhui, CHENG Long, ZHOU Xing, et al. Shear failure of stud-UHPC composite connection affected by interface friction [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 159: 108106. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108106
- [2] DOU Hongqiang, XIE Senhua, CHEN Feng, et al. Study on shear characteristics and a mechanics model of granite residual soil-rock interface [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(6): 212. DOI: 10.1007/s10064-023-03220-5
- [3] MARTINEZ A, PALUMBO S, TODD B D. Bioinspiration for anisotropic load transfer at soil-structure interfaces [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(10): 04019047. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002138
- [4] 刘汉龙, 任连伟, 郑浩, 等. 高喷插芯组合桩荷载传递机制足尺模型试验研究 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1395
LIU Hanlong, REN Lianwei, ZHENG Hao, et al. Full-scale model test on load transfer mechanism for jet grouting soil-cement-pile strengthened pile [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1395. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.05.041
- [5] 俞建霖, 徐嘉诚, 周佳锦, 等. 混凝土芯水泥土复合桩混凝土-水泥土界面摩擦特性试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2022, 55(8): 93
YU Jianlin, XU Jiacheng, ZHOU Jiajin, et al. Experimental study on frictional capacity of concrete-cemented soil interface of concrete-cored cemented soil column [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(8): 93. DOI: 10.15951/j.tmgexb.21121264
- [6] ABI E, SHEN Li, LIU Mingwei, et al. Calculation model of vertical bearing capacity of rock-embedded piles based on the softening of pile side friction resistance [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(5): 939. DOI: 10.3390/jmse11050939
- [7] CHEN Zejian, CHEN Wenbo, YIN Jianhua, et al. Shaft friction characteristics of two FRP seawater sea-sand concrete piles in a rock socket with or without debris [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(7): 06021015. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002059
- [8] 王驰, 徐永福, 庞建国, 等. 路堤荷载下砼芯水泥土桩复合地基现场试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(5): 974
WANG Chi, XU Yongfu, PANG Jianguo, et al. Application of concrete-cored DCM piles in soft subgrade improvement of expressways [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(5): 974
- [9] 郑浩, 刘汉龙, 雷玉华, 等. 高喷插芯组合桩水平承载特性大尺寸模型试验研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(1): 217
ZHENG Hao, LIU Hanlong, LEI Yuhua, et al. Large-scale model test analysis of behaviors of jet grouting (JG) soil-cement-pile

- strengthened pile under lateral load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 217. DOI: 10.16285/j.rsm.2011.01.039
- [10] 周佳锦, 龚晓南, 王奎华, 等. 静钻根植竹节桩在软土地基中的应用及其承载力计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(增刊 2): 4359
ZHOU Jiajin, GONG Xiaonan, WANG Kuihua, et al. Application of static drill rooted precast nodular pile in soft soil foundation and calculation for bearing capacity [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(Sup. 2): 4359. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.121
- [11] TANCHAISAWAT T, SURIYAVANAGUL P, JAMSAWANG P. Stiffened deep cement mixing (SDCM) pile: laboratory investigation [C]//International Conference on Concrete Construction. London: CRC Press, 2009: 39
- [12] LI Mengyao, LI Yonghui, RAJEDUL M, et al. Experimental study of the shear behaviors of the cement mortar-concrete interface[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, 34(11): 04022287. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004421
- [13] ZHOU Jiajin, YU Jianlin, GONG Xiaonan, et al. Influence of soil reinforcement on the uplift bearing capacity of a prestressed high-strength concrete pile embedded in clayey soil [J]. *Soils and Foundations*, 2020, 59(6): 2367
- [14] 张振, 张朝, 叶观宝, 等. 劲芯水泥土桩承载路堤渐进式失稳破坏机制[J]. *岩土力学*, 2020, 41(6): 2122
ZHANG Zhen, ZHANG Chao, YE Guanbao, et al. Progressive slope failure mechanism of stiffened deep mixed column-supported embankment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(6): 2122. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1057
- [15] LI Zhenbao, ZHANG Qianqing, XIAO Kai, et al. Reinforcement of soft soil foundation by waste soil prefabricated piles: a case study [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2024, 24(11): 05024010. DOI: 10.1061/IJGNAL.GMENG-9971
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水泥土配合比设计规程: JGJ/T 233—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Specification for mix proportion design of cement soil: JGJ/T 233—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011
- [17] 王伟. 基于能量耗散原理的土与结构接触面模型研究及应用[D]. 南京: 河海大学, 2006
WANG Wei. Study on soil-structure interface model based on potential energy dissipating and its application[D]. Nanjing: Hohai University, 2006
- [18] DAI Guoliang, SALGADO R, GONG Weiming, et al. The effect of sidewall roughness on the shaft resistance of rock-socketed piles [J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12: 429. DOI: 10.1007/s11440-016-0470-8
- [19] SEIDEL J P, COLLINGWOOD B. A new socket roughness factor for prediction of rock socket shaft resistance [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 38(1): 138. DOI: 10.1139/cgj-38-1-138
- [20] NAM M, VIPULANANDAN C. Roughness and unit side resistances of drilled shafts socketed in clay shale and limestone[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(9): 1272. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:9(1272)
- [21] 张冬霖, 卢廷浩. 一种土与结构接触面模型的建立及其应用[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(6): 62
ZHANG Dongji, LU Tinghao. Establishment and application of an interface model between soil and structure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(6): 62
- [22] 张嘎, 张健民. 粗粒土与结构接触面统一本构模型及试验验证[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(10): 1175
ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Unified modeling of soil-structure interface and its test confirmation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(10): 1175
- [23] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及数学模拟[J]. *岩土工程学报*, 1994, 16(3): 14
YIN Zongze, ZHU Hong, XU Guohua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16(3): 14
- [24] ZHU Shimin, CHEN Changfu, CAI Huan, et al. Analytical modeling for the load-transfer behavior of stiffened deep cement mixing (SDCM) pile with rigid cap in layer soils[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 144: 104618. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104618
- [25] 雷金波, 陈从新. 基于双曲线模型的带帽刚性桩复合地基荷载传递机制研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(11): 3385
LEI Jinbo, CHEN Congxin. Research on load transfer mechanism of composite foundation of rigid pile with cap based on hyperbolic model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(11): 3385. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.11.046
- [26] LIU Jie, ZHANG Keneng. Analysis of pile load-transfer under pile-side softening [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2003, 10(3): 231. DOI: 1005-9784(2003)03-0231-06